

И. В. КАСЬЯНЕНКО**ОСОБЕННОСТИ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ДЛИТЕЛЬНО ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПАРОПРОВОДОВ**

Изучение особенностей использования теплоустойчивых сталей для паропроводов и элементов их систем применительно к их наработке в условиях ползучести свыше 270000 ч. позволило: установить причины повреждаемости сварных соединений; уточнить механизмы развития трещин ползучести и трещин усталости; установить связь структуры с повреждаемостью; выявить изменение структурного состояния. Обобщение особенностей повреждаемости позволило уточнить типовые схемы повреждаемости, что целесообразно для ее уменьшения. Выявили, что при наработке сварных соединений свыше 270000 ч. в условиях участвующих пусков-остановов их повреждаемость по механизму усталости заметно увеличивается. Представлены особенности использования теплоустойчивых сталей для паропроводов и их сварных соединений. Рассмотрены механизмы повреждаемости сварных соединений паропроводов, длительно эксплуатируемых в условиях ползучести. Представлена зависимость повреждаемости от концентрации напряжений и от состояния структуры сварных соединений. Уточнили известную схему повреждаемости сварных соединений паропроводов применительно к их наработке свыше 270000 ч.

Ключевые слова: теплоустойчивые стали, структурное состояние, сварные соединения, повреждаемость, условия ползучести.

І. В. КАСЬЯНЕНКО**ОСОБЛИВОСТІ ПОШКОДЖУВАНOSTІ ДОВГОСТРОКОВО ЕКСПЛУАТОВАНИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПАРОПРОВОДІВ**

Вивчення особливостей використання теплостійких сталей для паропроводів і елементів їх систем стосовно їх напрацювання в умовах повзучості понад 270000 ч. дозволило: встановити причини пошкоджуваності зварних з'єднань; уточнити механізми розвитку тріщин повзучості і тріщин втоми; встановити зв'язок структури з пошкоджуваності; виявити зміни структурного стану. Узагальнення особливостей пошкоджуваності дозволило уточнити типові схеми пошкоджуваності, що доцільно для її зменшення. Виявили, що при напрацюванні зварних з'єднань понад 270000 ч. В умовах почастищення пусків-зупинок їх пошкоджуваність за механізмом втоми помітно збільшується. Представлені особливості використання теплостійких сталей для паропроводів і їх зварних з'єднань. Розглянуто механізми пошкоджуваності зварних з'єднань паропроводів, які тривалий час експлуатуються в умовах повзучості. Представлена залежність пошкоджуваності від концентрації напружень і від стану структури зварних з'єднань. Уточнили відому схему пошкоджуваності зварних з'єднань паропроводів стосовно їх напрацювання понад 270000 ч.

Ключові слова: теплопривки стали, структурний стан, зварні з'єднання, пошкоджуваність, умови повзучості.

I. KASYANENKO**SPECIFIC FEATURES OF THE DAMAGEABILITY OF THE WELDED JOINTS OF STEAM PIPELINES THAT HAVE BEEN IN SERVICE FOR A LONG TIME**

The aim of the work is to identify the features of damageability of welded joints of heat-resistant steels (12X1MF, 15X1M1F) for long-term creep exploitation. To achieve the goal in the study of the structure and damage, metallographic methods and methods for determining mechanical properties were used. Studying the peculiarities of using heat-resistant steels for steam pipelines and elements of their systems as applied to the production of power-generating blocks under creep conditions over 270,000 hours allowed: to establish the reasons for their damageability and destructibility; mechanisms for the development of creep cracks and fatigue cracks; connection structure with damage; structural changes. Established the relationship of damage with the presence of stress concentrators. The generalization of features of damage allowed to specify typical patterns of damage, which is advisable to reduce it. It was revealed that when welded joints are produced for more than 270,000 hours under the conditions of frequent start-stops of power units, their damage by the fatigue mechanism increases markedly. Revealed that damage by the mechanism of fatigue significantly depends on the structural state of the steam lines and their welded joints.

Key words: heat-resistant steels, structural state, welded joints, damageability, and creepage conditions.

Введение

Надежность оборудования энергоблоков ТЭС, выработавших свой парк ресурс, в настоящее время является важной проблемой энергетического комплекса Украины. В системе паропроводов энергоблоков их сварные соединения в значительной мере лимитируют их ресурс. Лимитирование обеспечивается наличием у сварных соединений значительной структурной, химической и механической неоднородности, увеличивающейся при их наработке свыше 270000 ч.

Переход на маневренный режим работы энергоблоков обеспечивает паропроводам и их сварным соединениям более жесткие условия работы. Например, количество пусков-остановов увеличи-

вается от 150 до 210 циклов в год, вместо запланированных 20–30. Увеличение жесткости эксплуатации требует соответственно и надежности работы оборудования, что обеспечивает изучение особенностей применения сталей для сварных соединений паропроводов. В первую очередь сварных соединений паропроводов, работающих в условиях ползучести и малоциклового усталости. В этой связи для получения оптимальной исходной структуры и свойств сварных соединений рассматривается технология сварки и технология термической обработки.

Цель работы

Целью работы является выявление особенностей повреждаемости длительно эксплуатируемых в условиях ползучести сварных соединений паропроводов из теплоустойчивых сталей (12Х1МФ и 15Х1М1Ф).

Изложение основного материала

При наработке сварных соединений паропроводного тракта (стали 12Х1МФ и 15Х1М1Ф) в условиях ползучести, свыше 250 тыс. ч, зависимость их повреждаемости от наличия дефектов и от структурного фактора существенно возрастает. Повреждаемость может ускоряться или происходить замедленно.

Представляется целесообразным изучение зависимости повреждаемости сварных соединений от появления дефектов, а так же от их структурного состояния, что необходимо для продления ресурса наработки сварных соединений.

В соответствии с положениями теории надежности разрушаемость изучаемых сварных соединений следует рассматривать как последующий процесс, основывающийся на реализации процесса их повреждаемости. По данным Ф. А. Хромченко [1], применительно к наработке сварных соединений 100–150 тыс. ч, около 40 % разрушений сварных соединений паропроводов и сосудов происходят от появления технологических дефектов. По нашим данным наличие технологических дефектов, применительно к наработке сварных соединений 270–300 тыс. ч, вызывает примерно 60 % разрушений.

Технологические дефекты образуются при изготовлении сварных соединений, а также при их монтаже, и могут быть как явными, так и скрытыми. К явным дефектам относят поры, утяжки и шлаковые включения. Такие дефекты принято считать объемными дефектами I-й группы. Трещины, подрезы, непровары, несплавления основного и наплавленного металла принято считать плоскими дефектами I-й группы. Локальная концентрация напряжений при наличии плоских дефектов является более высокой, чем при наличии объемных. Такие дефекты выявляются неразрушающими методами контроля. В процессе наработки сварных соединений свыше 270 тыс. ч их повреждаемость, вызванная наличием дефектов I-й группы, заметно снижается, что зависит от их вынужденной отбраковки на более ранней стадии эксплуатации. Однако при наработке сварных соединений свыше 270 тыс. ч начинают проявляться те дефекты, наличие которых допускается нормативной документацией [2–4]. Например, отступление поперечного сечения металла шва от проектной формы.

Технологические дефекты скрытого характера так же относят ко II-й группе дефектов. Такими дефектами принято считать браковочные структуры или структуры, близкие к браковочным. Например, на участке сплавления зоны термического влияния (ЗТВ) сварных соединений, наличие «мягких» прослоек, состоящих из сгруппированных перлитных зерен, симметрично расположенных относительно металла шва [5]. На участках сплавления ЗТВ номер аустенитного зерна может быть 3–4, (ГОСТ 5639-82). На участке неполной перекристаллизации новые продукты распада аустенита могут представлять глобуляризованный перлит [5]. Металл участка неполной перекристаллизации нагревается в область температур, ограниченную критическими точками A_{C1} – A_{C3} . Здесь, в зависимости от сварочного нагрева, может образовываться глобуляризованный перлит, глобуляризованный сорбит или глобуляризованный троостит.

Приведенные дефекты образуются при сварке на повышенных режимах, а также при нарушении режимов термической обработки. Рассматриваемые дефекты не выявляются неразрушающими методами контроля. Их проявление представляется на протяжении всей эксплуатации сварных соединений, начиная от десятков тысяч часов, что зависит от вида и природы самих дефектов. Условия эксплуатации, при наличии дефектов, также способствуют образованию повреждаемости металла сварных соединений. Например, перегревы и маневренный режим работы энергоблоков ускоряет повреждаемость при наличии браковочных структур. Повреждаемость, обусловленная совместным проявлением эксплуатационных причин и скрытых дефектов, проявляется на протяжении как паркового ресурса наработки сварных соединений, так и после его выработки.

Повреждаемость металла сварных соединений может происходить по механизму ползучести, по механизму усталости и по коррозионно-усталостному механизму. Преимущественно повреждаемость и последующая разрушаемость (по механизму ползучести) происходит по участкам сплавления, перегрева и неполной перекристаллизации ЗТВ сварных соединений, рис. 1 [1, 5].

Трещины усталости образуются в местах контакта разнотолщинных трубных элементов или возле подкладных колец, а также по металлу шва, см. рис. 1. Трещины ползучести на начальной стадии имеют интеркристаллитный характер развития, который затем, в процессе их развития, дополняется транскристаллитным и имеет смешанный характер, рис. 2.

Трещины усталости имеют так же смешанный характер на всей стадии их образования. Трещины хладноломкости, образующиеся в месте шва, от его корневой зоны в глубину шва, имеют в основном транскристаллитный характер. Повре-

ждаемость образуется локально, при наличии концентраторов напряжений, а также на участках ЗТВ, где присутствуют «мягкие» прослойки и имеет место увеличенный уровень деформации, превышающий допустимый [1, 5–6].

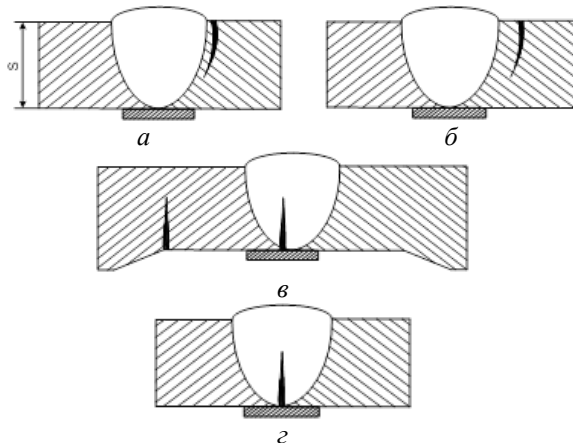


Рис. 1 – Типичные трещины в металле сварных соединений паропроводов:
а – трещина по участку перегрева ЗТВ;
б – по участку неполной перекристаллизации;
в – трещины усталости;
з – трещина хладноломкости

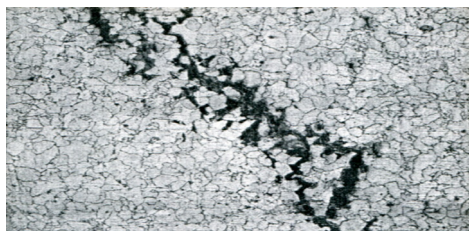


Рис. 2 – Межзеренный характер трещины ползучести в ЗТВ сварных соединений из стали 12X1МФ. Ресурс 280 тыс. ч [7]

Отмечается одновременное проявление конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, имеющих значительную степень влияния на повреждаемость сварных соединений. Это обеспечивает переход одного вида трещин в другой, что приводит к изменению механизмов их развития. Образующиеся трещины могут переходить из одного участка ЗТВ на другой.

После наработки сварных соединений свыше 270 тыс. ч увеличивается уровень повреждаемости по «хрупкой» прослойке, т.е. по участку перегрева ЗТВ, где аустенитные зерна меньше 4-го номера (ГОСТ 5639-82). Наличие крупных аустенитных зерен обуславливает металлу участка перегрева низкую длительную пластичность. Образование пор ползучести, и последующее преобразование их у трещин ползучести, происходит при рабочих параметрах, температуре $T = 545\text{--}585\text{ }^{\circ}\text{C}$, и напряжении $P = 20\text{--}25,5\text{ МПа}$ [8]. Трещины образуются

от поверхностных дефектов, их развитию способствуют сгруппированные и единичные поры. Трещины распространяются по участкам перегрева и сплавления ЗТВ, от поверхностной зоны сварного соединения в его глубину, симметрично вдоль кольцевого шва и имеют транскристаллитный характер, рис. 1. Края трещины гладкие. Подобные трещины образуются и в металле шва, при наличии в его структуре крупных зерен (бал меньше 4-го), сгруппированных в зоны. Местами зарождения трещин рассматриваемого типа являются технологические дефекты, а их развитие зависит от структурного состояния сварных соединений.

Низкие значения длительной пластичности металла шва и участков ЗТВ обеспечиваются наличием браковочных структур, рассматриваемых выше. Такие структуры формируются: при дуговой сварке на повышенных значениях параметров режима; при отпуске ниже $700\text{ }^{\circ}\text{C}$; при отпуске с недостаточной выдержкой; при отпуске, нагрев которого выше A_{C1} .

При отпуске, нагрев которого ниже рекомендуемой нормативными документами температуры, или при его недостаточной выдержке, сварочные напряжения снимаются не в полной мере. Наличие напряжений обеспечивается недостаточным выделением хрома, молибдена и ванадия из α -фазы. Дисперсное твердение также является недостаточным, не обеспечивает необходимые свойства. Твердость металла шва является повышенной, а значения ударной вязкости является ниже нормативных требований. Имеет место охрупчивание металла шва.

Приведенные технологические дефекты, образующиеся при заварке выборок (удаленный металл с наличием трещин или пор), способствуют при наработке отремонтированных элементов паропроводов свыше 50–70 тыс. ч, их ускоренной повреждаемости.

Повреждаемость по участку неполной перекристаллизации ЗТВ сварных соединений, эксплуатируемых в условиях ползучести, происходит на протяжении их всей наработки. Причиной повреждаемости является наличие глобуляризованных зерен перлита, сгруппированных в цепочки, расположенные по границам аустенитных зерен [7–8]. Повреждаемость так же ускоряется при наличии перегревов (аварийный сброс пара). Образование трещин первоначально происходит на наружной поверхности паропровода, а затем развивается в его глубину.

Трещины по участку неполной перекристаллизации развиваются по хрупкому механизму. Зарождение и развитие трещин, после наработки сварных соединений свыше 270 тыс. ч, проявляется ускоренно по сравнению с их образованием до указанной наработки. Заметим, что своевременное выявление образующихся трещин представляется весьма затруднительным.

Образование трещин по участку неполной перекристаллизации обеспечивает действие рабочих напряжений, превышающих допустимые. Действие напряжений, приводящих к образованию трещин, обусловлено конструктивным и эксплуатационным факторами, т.е. наличием локальных концентраторов напряжений. Например, в местах сопряжения трубных элементов разных толщин, в угловых сварных соединениях, отводах и др. К эксплуатационным факторам, приводящим к образованию трещин, относят: нарушение трассировки, неправильное расположение опор и подвесок, заземление отдельных участков паропроводов. Образование трещин в металле участков сплавления, перегрева и неполной перекристаллизации ЗТВ, а также в металле шва преимущественно происходит по хрупкому механизму. Заметим, что в металле шва трещины образуются при наличии в его структуре крупных зерен аустенита или сгруппированных крупных зерен феррита, а также при наличии перлитной составляющей.

Установили, что сварка элементов паропроводов, выполняемая на оптимизированных параметрах режима, позволяет уменьшить наличие браковочных структур, а также уменьшить структурную неоднородность сварных соединений. Заваривание выборок на оптимизированных режимах также позволяет заметно снизить уровень структурной неоднородности и наличие браковочных структур в восстанавливаемых элементах паропроводов.

Выводы

1. Установили, что повреждаемость сварных соединений паропроводов, длительно эксплуатируемых в условиях ползучести, зависит от совместного проявления технологического, конструкционного и эксплуатационного факторов, что требует уточнения, применительно к их наработке свыше 270 тыс. ч.

2. Установили, что повреждаемость металла сварных соединений паропроводов, при наличии в его структуре браковочных структур, значительно ускоряется при их наработке в условиях ползучести свыше 270 тыс. ч.

Список литературы

1. Хромченко Ф. А. *Ресурс сварных соединений паропроводов*. Москва: Машиностроение, 2002. 348 с.
2. РД 34.17.421-92. Типовая инструкция по контролю и продлению срока службы металла основных элементов кот-

лов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций. Москва: Служба передового опыта ОРГРЭС. 2002. 94 с.

3. РД 10-577-03. Типовая инструкция по контролю металла и продлению срока службы основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций. Москва: НПО «Промбезопасность», 2004.
4. СО 153-34.17.470-2003. Инструкция о порядке обследования и продления срока службы паропроводов сверхпаркового ресурса. Госгортехнадзор России Минэнерго России, РАО «ЕЭС России». Москва: ОАО «ВТИ», 2004.
5. Дмитрик В. В. *Сварные соединения паропроводов*. Харьков: Майдан, 2013. 163 с.
6. Елпанова Н. В. Влияние структуры на кинетику разрушения стали 12Х1МФ при ползучести. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1989. № 7. С. 36–39.
7. Glushko A. Researching of welded steam pipe joints operated for a long time. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 6. Issue 1(84). P. 14–20.
8. Дмитрик В. В., Глушко А. В., Григоренко С. Г. Особенности порообразования в сварных соединениях паропроводов в условиях длительной эксплуатации. *Автоматическая сварка*. 2016. № 9. С. 56–60.

References (transliterated)

1. Hromchenko F. A. (2002), *Resurs svarnykh soedinenij paroprovodov* [Resource of welded joints of steam lines], Mashinostroenie, Moscow, 348 p.
2. (2002), *RD 34.17.421-92. Tipovaja instrukcija po kontrolju i prodleniju sroka sluzhby metalla osnovnyh jelementov kotlov, turbin i truboprovodov teplovyh jelektrostantsij* [Standard instruction for monitoring and extending the life of the metal of the main elements of boilers, turbines and pipelines of thermal power plants], Sluzhba peredovogo opyta ORGRJeS, Moscow, 94 p.
3. (2004), *RD 10-577-03. Tipovaja instrukcija po kontrolju metalla i prodleniju sroka sluzhby osnovnyh jelementov kotlov, turbin i truboprovodov teplovyh jelektrostantsij* [Typical instructions for controlling the metal and extending the life of the main elements of boilers, turbines and pipelines of thermal power plants], NPO "Prombezopasnost", Moscow, Russia.
4. (2004), *SO 153-34.17.470-2003. Instrukcija o porjadke obsledovanija i prodlenija sroka sluzhby paroprovodov sverh parkovogo resursa* [Instructions on the procedure for inspection and extension of the life of steam pipelines beyond the park resource], Gosgortehnadzor Rossii Minjenergo Rossii, RAO "EJeS Rossii", OAO "VTI", Moscow, Russia.
5. Dmitrik V. V. (2013), *Svarnye soedinenija paroprovodov* [Welded steam line connections]. Majdan, Kharkov, 163 p.
6. Elpanova N. V. (1989), "Vlijanie struktury na kinetiku razrushenija stali 12H1MF pri polzuchesti [The influence of the structure on the kinetics of destruction of steel 12H1MF during creep]", *Metallavedenie i termicheskaja obrabotka metallov* [Metal science and heat treatment of metals], no. 7, pp. 36–39.
7. Glushko A. (2016), "Researching of welded steam pipe joints operated for a long time", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 6, Issue 1(84), pp. 14–20.
8. Dmitrik V. V., Glushko A. V., Grigorenko S. G. (2016), "Osobennosti poroobrazovanija v svarnykh soedinenijah paroprovodov v uslovijah dlitel'noj jekspluatacij [Features of pore formation in welded joints of steam pipelines in conditions of long-term operation]", *Avtomaticheskaja svarka* [Automatic welding], no. 9, pp. 56–60.

Поступила (received) 18.01.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Касьяненко Ігор Вікторович (Касьяненко Игорь Викторович, Kasyanenko Igor) – аспірант кафедри зварювання, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: igorkasyanenko@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>.